

非饱和土的基质吸力和张力吸力

栾茂田^{1,2,3}, 李顺群^{1,2,4}, 杨庆^{1,2}

(1.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2.大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024;
3.中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 4.辽宁工学院土木建筑系, 辽宁 锦州 121001)

摘 要:首先在既往关于非饱和土分类方法的基础上,根据孔隙水弯液面与土颗粒表面的搭接状态,将双开敞非饱和土进一步细分为搭接双开敞非饱和土和不搭接双开敞非饱和土。然后基于热力学原理,提出了另外一个与基质吸力紧密相关而又不同的吸力概念-张力吸力。通过基于水封闭非饱和土的理论计算,得出了张力吸力与基质吸力之间的定量关系,同时利用作者们所提出的等效吸力概念,对比了由基质吸力、张力吸力所产生的等效吸力,从而一方面揭示了张力吸力在非饱和土力学中的重要性,另一方面论证了等效吸力概念的科学性与实用性。

关键词:非饱和土;表面张力;饱和半径;张力吸力;合吸力;等效吸力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2006)07-0863-06

作者简介:栾茂田(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋土力学理论与实验技术、岩土力学基本理论与数值分析、非线性动力学与岩土地震工程等方面的科研和教学工作。

Matric suction and tension suction of unsaturated soils

LUAN Mao-tian^{1,2,3}, LI Shun-qun^{1,2,4}, YANG Qing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Department of Civil Engineering, Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Based on conventional classification system for unsaturated soils, the double-open unsaturated soil was further divided into the overlapped double-open unsaturated soil and non-overlapped double-open unsaturated soil according to the contact state of meniscus of pore water with the surface of the soil particles. Furthermore, the tension suction, which was closely related with but rather different from the matric suction, was presented on the basis of thermodynamics. Theoretical analysis on quantitative relation between matric suction and tension suction in unsaturated soils with isolated pore water was made. The equivalent suctions respectively corresponding to matric suction and tension suction were determined and compared by using the concept of equivalent suction given by the authors. Through the comparative study, the importance and essence of the tension suction in unsaturated soil mechanics was clearly displayed and the rationality of the concept of equivalent suction was illustrated.

Key words: unsaturated soil; surface tension; radius of saturation; tension suction; total suction; equivalent suction

0 前 言

非饱和土的工程特性强烈地依赖于其含水率或饱和度。由于饱和度在一定程度上与基质吸力有关,而且基质吸力比较直观,且可以通过试验测得。因此一般认为非饱和土的强度依赖于基质吸力^[1]。

沈珠江将非饱和土中除正应力所引起的抗剪强度之外的所有能提高强度的因素统称为广义吸力^[2],并将广义吸力分为毛管吸力和结构吸力两部分。基于表面张力的影响,汤连生提出了湿吸力的概念,同时认为作用于非饱和土土颗粒并对颗粒间相互作用有贡献的吸力包括本征结构吸力、可变结构吸力、有效基质

吸力、湿吸力和牵引力等五类吸力^[3]。为了与目前为大家普遍所接受的基质吸力概念保持一致,这里不拟提出与基质吸力概念相交叉或相互包涵的吸力概念,也不涉及由含水率变化引起的诸如双电层、渗透吸力、电磁力、盐分胶结力等变化作用,将由等直径球形颗粒所组成的最松散堆积体理想模型作为研究对象,且

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50179006);教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目(教技函[1999]2号);辽宁省教育厅科学研究计划资助(2004F105)

收稿日期:2005-04-04

不考虑重力对环状水形状的影响，探讨非饱和土的分类及其吸力效应。

1 非饱和土的分类

1.1 非饱和土的现有分类方法

依据不同研究目的，采用的非饱和土分类方法也不同。黄文熙等^[4]阐述的下述分类方法应用较为广泛。

(1) 水封闭非饱和土：土在饱和度较低时，大部分水以环状形式存在于土颗粒接触点周围，少量水以结合水形式包裹在颗粒表面。环状水相互独立，不能形成连续水体，不能传递水压力；而此时气相相互联通并且可以传递压力。

(2) 双开敞非饱和土：含水率增加时，环状水扩展成连续水体，水气两相此时都连续，均能传递压力。

(3) 气封闭非饱和土：当饱和度进一步增大，当水气界面不再与土颗粒搭接且自行封闭起来时，气相将被封闭为空气泡，自此直至完全饱和状态，只有水相连续。

1.2 非饱和土的新分类

为了研究不同饱和状态下吸力效应，首先必须进一步探讨非饱和土的分类体系。

非饱和土的一个重要特征是孔隙水具有明显的表面现象。对于水封闭非饱和土，如图 1(a) 所示，弯液面全部在土颗粒表面搭接，表面张力全部作用于土颗粒。对于气封闭非饱和土，在气泡边界上，表面张力与液压平衡，对土颗粒没有产生直接的作用，即表面张力对颗粒的作用完全表现为液压。

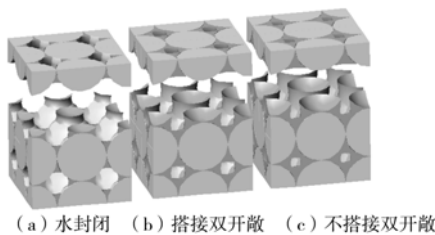


图 1 非饱和土中孔隙水的不同状态

Fig. 1 Different states of pore water in unsaturated soils

较为复杂的情况是双开敞非饱和土。考虑到表面张力对土颗粒的作用，作者们认为可以按弯液面是否与颗粒表面搭接而将这种非饱和土进一步地细分为两种非饱和土：单个颗粒周围的弯液面仅部分与颗粒自身的表面搭接，其余部分则与其它颗粒周围的弯液面相联，不同颗粒周围的弯液面之间可以传递表面张力，这里将处于这种状态的非饱和土称为搭接双开敞非饱和土，如图 1(b) 所示；当饱和度进一步增大时，弯液面完全不与颗粒表面搭接，此时各颗粒四周的表面张力在孔隙水表面传递，表面张力对颗粒不产

生直接的作用，这里将处于这种状态的非饱和土称为不搭接双开敞非饱和土，如图 1(c) 所示。由此可见，对于这两种非饱和土，表面张力的作用是完全不同的。

Fredlund^[5-6]和 Bishop^[7]两种强度理论认为，孔隙气压力与孔隙水压力之差所形成的基质吸力 $s = u_a - u_w$ 是控制非饱和土强度的重要因素。实际上，作为一种液体表面效应，基质吸力的大小等于液面内外的压力差，除此之外，在液体表面还存在不可忽视的表面张力，但是至今对表面张力与颗粒搭接并可能发挥“直接作用”的重要性尚未得到认识，更缺乏定量分析。为此，本文首先针对水封闭非饱和土，探讨了张力吸力及其与基质吸力的相互关系，进而应用等效吸力的概念分别确定了与张力吸力与基质吸力相应的等效吸力，并进行了比较。考虑到搭接双开敞非饱和土中张力吸力的作用非常复杂，而不搭接双开敞非饱和土和气封闭非饱和土两种状态中不存在液面与土颗粒搭接的情况，因此本文暂仅以水封闭非饱和土的情况，其他两种情况将在另文讨论。

2 各种饱和状态下的吸力作用

2.1 水封闭非饱和土

在环状水或水封闭条件下，由于表面张力作用，颗粒与孔隙水之间的相互作用关系如图 2 所示。此时弯液面全部与颗粒表面搭接。其中 a 为颗粒间距的一半， b 为液面的高度，定义为饱和半径， δ 为接触角， σ 为表面张力系数。根据热力学原理，当饱和半径给定时可以确定基质吸力^[8]。另外截取左侧球形颗粒为隔离体，参见图 1(a) 和图 2，则表面张力 σ 在 x 方向所形成的合力 T 为

$$T = 2\pi y\sigma \sin(\delta + \arcsin(\frac{y}{R})) \quad (1)$$

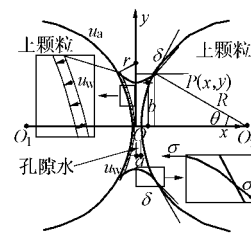


图 2 水封闭非饱和土中基质吸力和张力吸力的计算模型

Fig. 2 Computational model for matric suction and tension suction in unsaturated soils with isolated pore water

根据图 1(a) 和图 2，基质吸力为均匀作用于球冠的分布力，其合力与 T 方向一致。将 T 在基质吸力作用范围内的等效分布力定义为张力吸力 s_t ，则

$$s_t = \frac{T}{\pi y^2} = \frac{2\sigma \sin(\delta + \arcsin(\frac{y}{R}))}{y} \quad (2)$$

对于非饱和土, 除气封闭情况之外, 均可认为孔隙气与大气联通, 孔隙气压力等于 0; 在不考虑重力作用的情况下, 水环内各点压力相等, 因此各点基质吸力均为

$$s = -u_w \quad (3)$$

由此可见, 在水封闭的非饱和土中, 同时存在基质吸力和张力吸力两种效应。值得指出的是, 这里所提出的张力吸力和毛细吸力^[8]在概念上有所不同, 苗天德以 ξ 平面(图 2 中过 O 点且正交于轴 O_1O_2 的平面)为参考平面, 定义了毛细吸力和附加内压力^[8], 具有力的量纲。而这里的张力吸力与基质吸力具有应力的量纲。当含水率增大到一定程度时, 不同的水环之间将出现交叉和重叠, 此时以 ξ 平面为参考平面所定义的毛细吸力可能导致计算的不准确性或概念上的模糊性。而这里的张力吸力与基质吸力一样, 作用在球面上, 以此为基础更便于采用等效吸力的概念。

2.2 搭接双开敞非饱和土

对于搭接非饱和土, 固体颗粒、孔隙水与孔隙气三相之间的相互关系如图 1(b) 所示。只有部分弯液面与颗粒表面搭接, 其余部分则相互联通, 不同颗粒接触点处的孔隙水可以传递水压。此时仍然同时存在基质吸力和张力吸力。按照圆形液面假设, 此时各片水将出现相互交叉与重叠, 同时弯液面与颗粒表面的搭接关系也非常复杂, 从而使得基质吸力的作用面积和张力吸力的计算极度困难。

2.3 不搭接双开敞非饱和土

当饱和度进一步增大至颗粒表面的所有区域都为水所包围时, 弯液面就不再与颗粒表面搭接了, 如图 1(c) 所示, 此时只有基质吸力对颗粒存在作用, 张力吸力则沿着液面传播, 张力吸力本身将不再对土颗粒直接产生作用。

2.4 气封闭非饱和土

对于气封闭非饱和土, 饱和度比较大, 实际上基质吸力很小, 基质吸力对土的工程性质基本上没有影响, 同时张力吸力对颗粒也不存在作用。

3 水封闭非饱和土中的吸力分析

为了定量考察不同饱和度状态下基质吸力与张力吸力的大小及其作用效应, 针对颗粒间距为 $a = 0$ 和不同饱和半径 b 等情况, 笔者采用所建议的方法^[8]根据式 (1) 和式 (2) 计算了水封闭状态下的两种吸力, 计算结果列于表 1。其中 V_{11} 为单片水环的体积, $V_{11} = 3V_{11}$ 为每个颗粒周围的孔隙水体积, A_{11} 为单个水环在某个颗粒表面的作用面积, $A_e = 6A_{11}$ 为每个颗粒周围孔隙水的作用面积。

为了客观地反映基质吸力和张力吸力的相对关系, 将某一饱和度时张力吸力 s_t 与基质吸力 s 之比定义为吸力比 k , 同时将基质吸力与张力吸力之和定义为合吸力 s_s , 于是

$$k = \frac{s_t}{s} \quad (4)$$

$$s_s = s + s_t = (1+k)s \quad (5)$$

由表可见, 一般情况下张力吸力是存在的, 而且有时远大于基质吸力。由此可以认为张力吸力的作用是不可忽略的, 合吸力总是大于基质吸力。

目前通用的基质吸力概念仅着眼于其大小, 而没有考虑同样重要的作用面积。因此作者们建议采用等效基质吸力概念^[9], 等效吸力为吸力在颗粒总表面积上的平均值。将这一概念分别应用于张力吸力及合吸力, 与之相对应的等效张力吸力 s_t^e 和等效合吸力 s^e 分别定义为

$$s_t^e = s_t \frac{A_e}{A}, \quad s_s^e = s_s \frac{A_e}{A} \quad (6)$$

式中, A 为颗粒的总表面积。根据表 1 所列计算结果, 所得到的不同接触角情况下吸力比与饱和半径之间的关系如图 3(a) 所示。

由图可见, 随着饱和半径的增大, 张力吸力的作用相应地增大, 当饱和半径超过某一数值而即使较小时, 张力吸力的效应就可能超过基质吸力的作用而成为主导因素。令 $\xi = \ln k$, 则在半对数坐标系中, 吸力比与饱和半径之间的关系如图 3(b) 所示, 由图可见吸力比的对数与饱和半径近似地呈现较好的线性关系, 于是可以采用直线 $\xi = \alpha b - \beta$ 进行拟和, 采用最小二乘法所确定的拟合系数列于表 2, 相应的拟合直线如图 3(c) 所示。由表 2 可见, α 和 β 均随接触角的增大而减小, 但变化幅度很小, 因此为了不过于复杂又能满足精度需要, 对 α 和 β 随接触角的变化暂时不予考虑, 直接取 α 和 β 分别为 9.2 和 4.4。在接触角不是太大的情况下, 尤其是对于岩土矿物, 与水的接触角都不大, 这个取值具有足够的精度。于是张力吸力与基质吸力之比与饱和半径的关系近似地表达为

$$k = \exp(9.2b - 4.4) \quad (7)$$

由此可见, 随饱和半径增大, 张力吸力与基质吸力之比增大, 张力吸力效应增大; 而饱和度越小, 张力吸力的贡献越小。但即使在饱和度很低的情况下, 比如 $s_r=1.1\%$, 张力吸力与基质吸力之比也在 20% 左右, 即张力吸力约占合吸力的 1/6; 当饱和度达到 $s_r=17\%$ 时, 张力吸力与基质吸力之比可达 2~4。因此对于水封闭非饱和土, 张力吸力的作用必须加以考虑而不能予以忽略。

在科学试验和实际工程中, 基质吸力可以通过各

续表

$\delta / (^\circ)$	$b / \mu\text{m}$	$x / \mu\text{m}$	$y / \mu\text{m}$	$r / \mu\text{m}$	$V_{11} / \mu\text{m}^3$	$V_{1t} / \mu\text{m}^3$	$A_{11} / \mu\text{m}^2$	$A_e / \mu\text{m}^2$	$s_r / \%$	s / kPa	s^e / kPa	s_t / kPa	s^e_t / kPa	k	$\zeta = \ln k$	s_s / kPa	s^e_s / kPa
0	0.30	0.0604	0.3423	0.0643	0.014	0.042	0.3795	2.2770	1.10	891.97	161.58	146.00	26.45	0.1637	-1.8098	1037.97	188.03
	0.33	0.0752	0.3804	0.0813	0.0213	0.0639	0.4725	2.8350	1.68	676.70	152.62	146.00	32.93	0.2158	-1.5336	822.70	185.55
	0.35	0.0861	0.406	0.0942	0.027	0.0810	0.5410	3.2459	2.13	566.38	146.25	146.00	37.70	0.2578	-1.3557	712.38	183.95
	0.38	0.1043	0.4447	0.1165	0.0382	0.1146	0.6553	3.9320	3.01	434.50	135.92	146.00	45.67	0.3360	-1.0906	580.50	181.59
	0.40	0.1176	0.4706	0.1333	0.047	0.1410	0.7389	4.4334	3.70	365.14	128.78	146.00	51.49	0.3999	-0.9167	511.14	180.28
	0.43	0.1396	0.5095	0.1622	0.0638	0.1914	0.8771	5.2628	5.02	280.29	117.35	146.00	61.13	0.5209	-0.6522	426.29	178.48
	0.45	0.1555	0.5355	0.1841	0.0770	0.2310	0.9770	5.8622	6.06	234.30	109.27	146.00	68.09	0.6231	-0.4730	380.30	177.36
	0.48	0.1813	0.5743	0.2215	0.1008	0.3024	1.1391	6.8348	7.94	177.49	96.51	146.00	79.39	0.8226	-0.1953	323.49	175.89
	0.50	0.2000	0.6000	0.2500	0.1200	0.3600	1.2566	7.5398	9.45	146.00	87.57	146.00	87.57	1.0000	0.0000	292.00	175.15
	0.53	0.2301	0.6381	0.2988	0.1523	0.4569	1.4458	8.6746	11.99	106.57	73.55	146.00	100.75	1.3699	0.3148	252.57	174.30
	0.55	0.2516	0.6632	0.3361	0.178	0.5340	1.5808	9.4851	14.02	84.47	63.74	146.00	110.17	1.7284	0.5472	230.47	173.91
	0.58	0.286	0.7001	0.4005	0.2217	0.6651	1.7970	10.7819	17.46	56.41	48.39	146.00	125.23	2.5882	0.9510	202.41	173.62

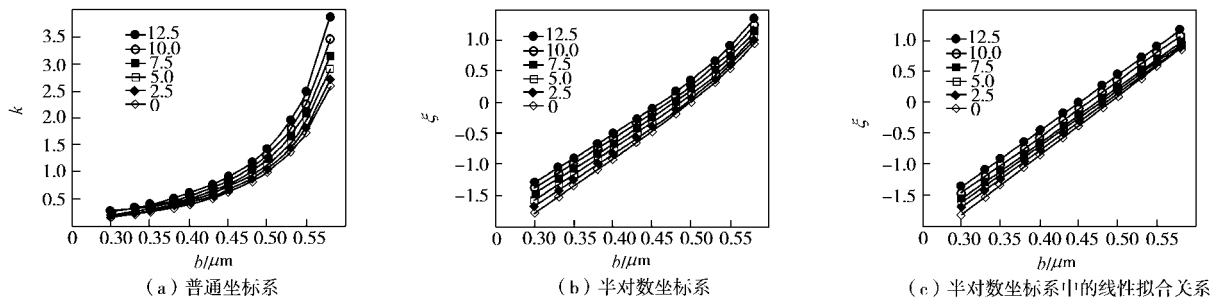


图 3 不同接触角($\delta=12.5^\circ$ 、 10° 、 7.5° 、 5° 、 2.5° 和 0°)情况下吸力比与饱和半径的关系

Fig. 3 Relationship between suction ratio and saturation radius for different contact angles ($\delta=12.5^\circ$, 10° , 7.5° , 5° , 2.5° and 0°)

种方法测得,最简捷的方法是根据含水率由非饱和土的土水特征曲线确定基质吸力。而由于张力吸力是由表面张力等效得到的,因此无法直接测定。根据饱和度和,利用经验关系(6)可得到张力吸力与基质吸力之比,再由基质吸力和吸力比确定张力吸力。进而可确定合吸力及其相应的等效合吸力。

表 2 吸力比对数与饱和半径之间近似线性关系的拟合系数
Table 2 The parameters defined by curve-fitting in the empirical correlation between logarithmic saturation radius and suction ratio

接触角 $\delta / (^\circ)$	α	β	标准差
12.5	9.1	4.1	0.2760
10.0	9.1	4.2	0.2470
7.5	9.1	4.3	0.2242
5.0	9.2	4.4	0.2057
2.5	9.3	4.5	0.1925
0.0	9.6	4.7	0.1816

对表 1 所列的计算结果进行分析,对于不同的接触角,所得到的基质吸力、张力吸力和合吸力与饱和度之间的关系如图 4 所示。由图 4 可见,在理论上讲,基质吸力、张力吸力和合吸力均随饱和度的增加而减小。然而张力吸力的变化幅度较小,可以认为张力吸力近似为一常量,合吸力的变化主要由基质吸力的变化所引起。当饱和度增大而使非饱和土处于搭接双开敞状态时,由于液面与土颗粒的搭接迅速减小,张力吸力也将迅速减小,当饱和度继续增大而使非饱和土处于不搭接双开敞状态时,由于液面不再与颗粒搭接,

张力吸力将降低为 0。在气封闭非饱和土中,由于孔隙气根本不与颗粒表面搭接,张力吸力根本不存在。因此在双开敞状态下,随着饱和度的增大,合吸力将呈现出一个较大的降低。

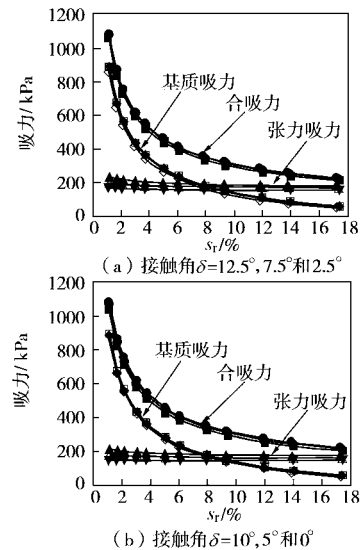


图 4 各种吸力与饱和度之间的理论关系

Fig. 4 Theoretical interrelations between various types of suctions and saturation degree

为了同时反映吸力大小与作用面积的共同效应,根据表 1 所列计算结果,图 5 给出了各种等效吸力与饱和度之间关系。由图可见,随着饱和度的增大,等效基质吸力迅速降低,而等效张力吸力增大;等效合

吸力变化不大。实际上,随着饱和度的增大,液面与颗粒的搭接边界也相应地增加,由于液体的表面张力系数与液体性质和孔隙气有关,因此张力的作用随之增大。当饱和度进一步增大而使非饱和土处于搭接双开敞状态时,部分甚至全部液面将不再与颗粒表面搭接,于是等效张力吸力将随着饱和度的增大而减小。随着饱和度的增大,等效基质吸力的降低与等效张力吸力的增大大致相等,从而使得等效合吸力基本上保持不变。这与环状水状态(低含水率)时土的强度基本上不随饱和度而变化的事实^[1]相符合。

Fredlund^[1]早就指出:基质吸力对土的抗剪强度具有重要的影响,但随着土趋于完全变干,这种影响变得越来越不显著。然而过去由于一直没有认识到张力吸力的存在及其重要作用,因此对这一现象一直未能从理论上给予合理的解释。当考虑张力吸力时,在土体趋于完全变干的情况下,孔隙水必然处于环状状态,此时根据上述计算与分析可知等效合吸力基本上不依赖于饱和度的变化,从而土的强度也基本上不变。

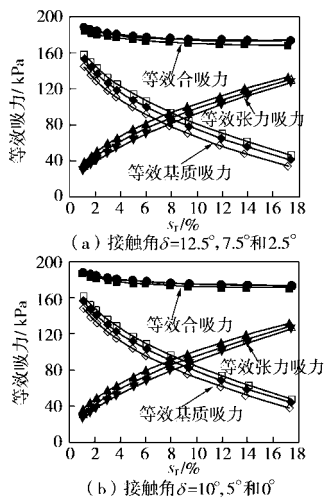


图5 各种等效吸力与饱和度之间的理论关系

Fig. 5 Theoretical interrelations between various types of equivalent suctions and saturation degree

4 结 论

在既往关于非饱和土分类方法的基础上,根据孔隙水液面与土颗粒表面搭接状态,将双开敞非饱和土进一步分为搭接双开敞非饱和土和不搭接双开敞非饱和土。提出了另外一种与基质吸力密切相关而又完全不同的吸力,称为张力吸力。通过热力学与几何分析建立了张力吸力与基质吸力之间的相关关系,进而通过比较分析明确了张力吸力在非饱和土中的重要作用。同时基于等效吸力的概念得到了等效张力吸力与等效合吸力。根据由理论分析所得到的计算结果,通过对比分析表明,在水封闭非饱和土中,随着饱和度

的增大,等效基质吸力迅速减小,等效张力吸力增大;等效合吸力变化较小。从而从理论上合理地解释“随着土变干,饱和度对土的强度作用减弱”的试验现象。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G.非饱和土土力学[M].陈仲颐,等译.北京:中国建筑工业出版社,1997.(FREDLUND D G. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.)
- [2] 沈珠江.广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J].岩土工程学报,1996,18(2):1-9. (SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2):1-9.)
- [3] 汤连生.从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论[J].岩土工程学报,2001,23(4):412-417. (TANG Lian-sheng. New suggestion on shear strength in unsaturated soil based on suction between grains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4):412-417.)
- [4] 黄文熙.土的工程性质[M].北京:水利电力出版社,1983. (HUANG Wen-xi. Engineering properties of soil [M]. Beijing: Hydraulic and Power Press, 1983.)
- [5] FREDLUND D G.非饱和土的力学性能与工程应用[J].岩土工程学报,1991,13(5):24-35.(FREDLUND D G. The mechanical properties and their engineering applications to unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(5):24-35.)
- [6] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978,15(3):313-321.
- [7] BISHOP A W, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils[C]// Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. London, 1960:503-532.
- [8] 苗天德,慕青松,刘忠玉,等.低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度[J].岩土工程学报,2001,23(4):393-396. (MIAO Tian-de, MU Qing-song, LIU Zhong-yu. et al. Effective stress and shear strength of unsaturated soil with low water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4):393-396)
- [9] 栾茂田,李顺群,杨庆.非饱和土的理论土-水特征曲线[J].岩土工程学报,2005,27(6):611-615.(LUAN Mao-tian, LI Shun-qun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6):611-615)